

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЛАНАРНЫХ И В ОДНОМЕРНО ШИРОКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

А.С. Андреев, В.Ф. Взятыйшев, А.Ю. Гурьянов, В.В. Крутских, А.Э. Мирзоян
(Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ», vitaidea@yandex.ru)

DIFFRACTION PHENOMENA IN PLANAR AND ONE-DIMENSIONAL-WIDE DIELECTRIC STRUCTURES

A.S. Andreev, V.F. Vziatyshev, A.Yu. Gur'ianov, V.V. Krutskikh, A.E. Mirzoian

В развитие работы [1] проводится экспериментальное и приближенное модельное исследование явлений при дифракции направляемых волн и волновых пучков в планарных диэлектрических структурах (ПлДС): имеющих одну границу и имеющих две границы (параллельные и/или сходящиеся). Изучаются различные типы границ: плоские, ступенчатые и плавные. Особое внимание обращается на области параметров, где имеет место явление полного отражения, а также явление его почти полного отсутствия.

Исследуется резонансная ПлДС, состоящая из отрезка одномерно широкого диэлектрического волновода (ОШДВ) и двух плоских полупрозрачных отражателей. Показана возможность формирования с помощью такой ПлДС чистых мод ОШДВ высокого порядка, что необходимо для изучения волновых и дифракционных процессов в ПлДС.

Экспериментально и на моделях изучаются ПлДС в виде клинообразного отрезка ОШДВ. Рассмотрены дифракционные явления, происходящие при прохождении высших типов волн (ВТВ) ОШДВ через области соответствующих критических сечений. Особое внимание уделено оценке уровня очень малых отражений ВТВ от критических сечений.

Более подробные сведения о докладываемой работе содержатся в [2-4], а также в докладе [5]. Работа выполнялась по проекту, поддержанному Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант РФФИ № 11-08-01249а).

1. Постановки задач

Среди необычных, по физике базовых процессов, КВЧ диэлектрических структур (ДС) ПлДС занимают особое положение. Они выполняются в виде двухмерной области, вырезанной из ПлДВ. В схемы на основе трехмерных ДВ они включаются либо с применением явления преобразования размерности электромагнитных волн [1], либо с помощью волноводно-пучковых преобразователей (ВПП), стыкуемых с границами ПлДС.

При этом очень важны изучаемые в [2] закономерности дифракции (отражения и преломления) на границах пластины однородных собственных волн ПлДВ, а также сформированных из них пучков.

Среди перспективных трехмерных ДС особое место занимают ОШДВ, один из поперечных размеров которого много больше другого. Строгой теории ОШДВ до сих пор нет. В [3] предложен корректный **метод и инструмент** экспериментального изучения замедлений и распределений полей собственных волн ОШДВ, в том числе и ВТВ.

Дифракционные процессы в многомодовых ДС непременно включают в себя возникновение и распространение ВТВ. А поскольку такие ДС будут включать и **нерегулярные участки** – в первую очередь, участки с изменяющимся сечением, то в них непременно будут иметь место области **критических сечений** (КС) ВТВ. В [4] ставится задача изучения дифракционных явлений, происходящих в областях КС ВТВ.

Многомодовые элементы ДС входят в состав диэлектрических соединений. **Уникальные свойства направленности и согласованности** таких соединений со стороны всех плеч известны на эвристическом уровне научного открытия [6], но не изучены аналитически и количественно. Более подробно многоплечие соединения на ДС обсуждаются в докладе [5]. Там же кратко описывается история познания свойств и принципов действия таких волноводных устройств. Интересно заметить, что впервые уникальные свойства направленности и согласованности таких соединений на открытых диэлектрических волноводах (ДВ), имеющие место даже при нечетном числе плеч, были обнаружены и экспериментально изучены

конце 1950-х – начале 1960-х годов. В число авторов [5] входят И.Ф.Будагян и В.Ф.Дубровин, принимавшие участие в этих пионерских работах более чем полувековой давности.

2. Дифракционные явления на границах одномодовых ПлДС

Первой задачей этой части работы стало изучение комплексных коэффициентов отражения и преломления при разных углах падения пучка на торец ПлДС, особенно в области **полного отражения** от торца. Эвристическим дополнением стало изучение особенностей дифракционных явлений не только при плоской форме, но и при «неоднородных» (заостренной и ступенчатой) формах торца.

Для решения поставленной задачи использовалась установка, показанная на рис. 1 (вид сверху). Исследуемая ДС, имеющая форму плоского полудиска, связана с тремя клинообразными ВПП. ВПП-1 выполняет роль возбуждителя ПлДС, формируя из КВЧ сигнала в плече 1 волновой пучок исследуемой ДС. Отраженный при дифракции на границе пучок преобразуется с помощью преобразователя ВПП-2 в КВЧ сигнал в плече 2. А преломленный волновой пучок – с помощью преобразователя ВПП-3 – в КВЧ сигнал в плече 3.

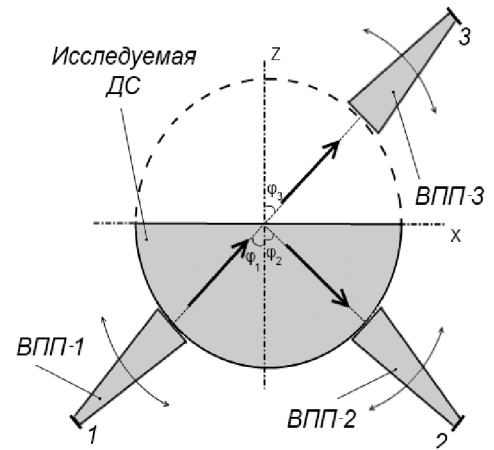


Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки

Используя калиброванные² ВПП, измерялись элементы матрицы рассеяния ДС: $S_{21}(\varphi_2, \varphi_1)$, характеризующий дифракционно преобразованный пучок, возникший в результате отражения, и $S_{31}(\varphi_3, \varphi_1)$, характеризующий пучок, возникший в результате преломления. По абсциссам их максимумов **определялись зависимости между углами падения, отражения и преломления** $\varphi_2(\varphi_1)$ и $\varphi_3(\varphi_1)$, а по нормированным экстремальным значениям S_{21} и S_{31} – **коэффициенты пучковой дифракции (отражения и преломления)**. Опыты проводились при различных поляризациях волн пучков.

После этого ДС с формой полудиска с «нормальным» торцом (рис. 2а), заменялась на ДС с формой такого же полудиска, но с заостренной формой торца (рис. 2б), а затем и со ступенчатой формой торца (рис. 2в). Для этих двух новых типов ДС снимались и изучались зависимости $S_{21}(\varphi_2, \varphi_1)$ и $S_{31}(\varphi_3, \varphi_1)$ при различных видах поляризации.

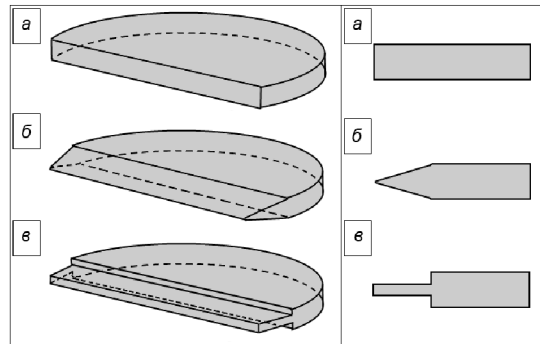


Рис. 2. Исследуемые ДС и их сечения в плоскости Z0Y

Уже в ходе работ, в развитие предварительного их плана, возникли новые вопросы.

- Возможно ли, подбором формы и параметров «неоднородного» торца ПлДВ (по типу рис. 2 б и в), достичь резкого уменьшения отражения от торца?
- При каких условиях, и до какого уровня возможно снижение «нормального» отражения?

Для получения ответов на эти вопросы были проведены несколько серий опытов. Их результаты будут описаны и обсуждены в докладе. Отметим, что удалось найти такие сочетания обликов (конструкций) и параметров торца ПлДВ, при которых дифракция волн ПлДВ на его торцах проявляет, казалось бы, **несовместимые качества**.

Полученные результаты могут быть применены в различных приложениях.

1) Закономерности полного отражении от нормальных торцов ПлДВ полезны при оценке точности расчета ОШДВ методом «эквивалентной диэлектрической проницаемости».

2) Закономерности полного отражения от «неоднородных» торцов ПлДВ могут быть применены для расчета ОШДВ с такими боковыми гранями.

² При калибровке ВПП-2 к плоской грани ДС подводился плоский металлический отражатель.

3) Обнаруженное «Явление нулевого и полного отражения от торцов ПлДВ специальной формы» может послужить основой для создания конструкций ОШДВ с уменьшенным отражением высших мод от областей их критических сечений на сужающихся участках ОШДВ [5], а также для разработки конструкций ДС, имеющих повышенные уровни согласования и направленности со стороны всех плеч и выполненных на основе открытия [6].

3. Формирование волн с помощью резонаторной ПлДС.

Макет изучаемой в этой части работы ПлДС вместе со схемой его исследования показан на рис.3. Он состоит из **отрезка ОШДВ 1** с нормально обрезанными торцами и двух плоских сетчатых металлических **отражателей 2 и 3**, расположенных перпендикулярно оси отрезка ОШДВ вплотную к его торцам.

Резонатор возбуждается от сканируемого по частоте КВЧ генератора 4 ($\lambda = 8-12$ мм) с помощью отрезка 5 одномодового ДВ. Кроме того, в установке имеются еще **два устройства**:

- устройство для анализа **поперечного** распределения поля из диэлектрического зонда 6 и детектора Д2 с индикатором (на рис.1 оно показано справа от отражателя 3);
- устройство для анализа **продольного** распределения поля из зонда 7, установленного на каретке продольного перемещения).

Разрабатываемая ДС является, по принципам ее работы, **дифракционным устройством**. С учетом свойств и закономерностей происходящих в ней **дифракционных явлений** изучены и приняты два решения: выбор густоты сеток и выбор длины резонатора.

В результате работы **обоснованы и выбраны** параметры, и по ним **реализован** макет резонансной ПлДС, способной отфильтровать одну нужную моду ОШДВ (включая ВТВ). С помощью этого макета экспериментально **изучены замедления и распределения полей** первых десятка типов волн в ОШДВ. Показана **возможность формирования** с помощью разработанного макета **чистых мод** ОШДВ высокого порядка. Эта возможность совместно с авторами работы [4] реализована в задаче изучения поведения ВТВ ОШДВ на плавно сужающемся отрезке ОШДВ.

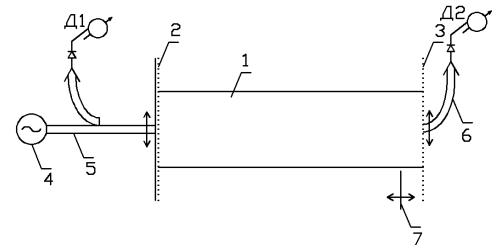


Рис. 3. Схема резонаторной установки

4. Поведение ВТВ в области критических сечений нерегулярных ДС (НДС)

Ключевым шагом в конкретизации этой части работы, более подробно описанной в [4], стал выбор вида НДС в качестве **объекта исследования**. Изучив и приняв во внимание противоречивые **критерии выбора**, в качестве **объекта изучения** выбран планарный **диэлектрический клин (ПДК)** - отрезок ОШДВ с монотонно изменяющейся шириной. Его форма на рис. 4 совмещена с описывающей ПДК эквивалентной $(n+1)$ -плечей КВЧ схемой.

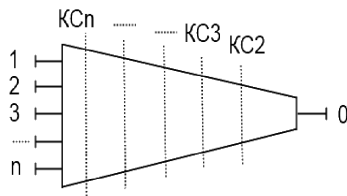


Рис. 4. Эскиз конструкции и схема ПДК: 0 – одномодовое плечо; 1, ..., n – плечи по 1-ой, ..., n-ой моде ОШДВ; КС_i критические сечения

Рабочая гипотеза работы [4] содержит следующие гипотетические положения (ГП):

ГП1. Ключевую роль в поведении ВТВ играют процессы в областях **критических сечений (КС)** соответствующих ВТВ (на рис. 1 эти сечения показаны тонкими вертикальными линиями).

ГП2. В **открытых волновых структурах** и, в частности, в ДС (в отличие от закрытых структур, где, как хорошо известно, от этих областей происходит **полное отражение** ВТВ) – отражение должно быть **намного меньше**.

Отсюда главные **задачи работы**: выяснить, насколько именно малы отражения от областей КС; узнать, нельзя ли эти отражения от КС в ОШДВ еще уменьшить; если это возможно, то какими средствами этого можно достичь.

В модельном исследовании применен метод парциальных волн, согласно которому разные волны ОШДВ (и ВТВ тоже) представляются суммой двух волн ПлДВ, переотражающихся между боковыми гранями ОШДВ. Мы распространили этот подход и к ситуациям неполного отражения (при углах падения меньших, чем угол полного отражения).

Описанный качественный анализ мы дополнили и направляли **развитым экспериментом**. Одна из основных решенных при этом проблем - возбуждение в ОШДВ чистых ВТВ разного типа. Разработанный А.Э. Мирзояном в [3] диэлектрический резонатор на сетках (слева на рис. 5), мы успешно применили для получения чистых ВТВ.

Еще один специфический экспериментальный прием, который был обнаружен эвристически – это способ оценки очень малого уровня отражений ВТВ от КС через измерение элемента матрицы рассеяния S_{21} у диэлектрического соединения рис. 6.

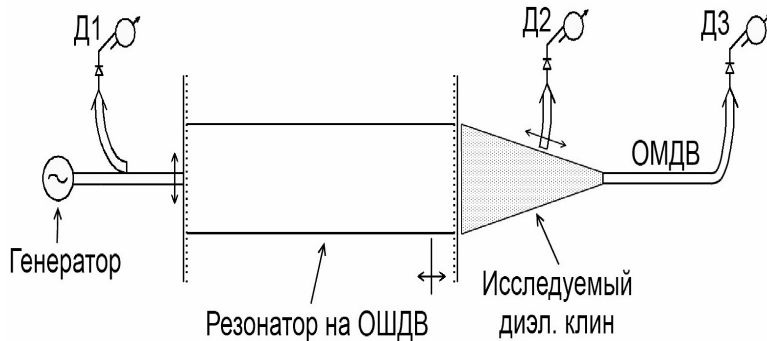


Рис. 5. Эскиз установки для изучения поведения ВТВ высоких номеров в областях КС.

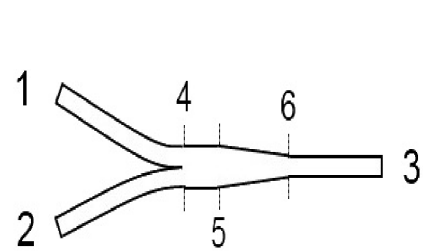


Рис. 6. Эскиз диэлектрического соединения [6]

Полученные в работе предварительные результаты поставили и заставили нас решить ряд новых вопросов: как оптимизировать нерегулярные структуры для лучшего выделения мод, как усовершенствовать методы для анализа таких структур.

Дальнейшее развитие эта часть работы может получить благодаря применению клиновидных структур в многоплечих ДС (пример трехплечего соединения изображен на рис. 6). Ведь именно поведение ВТВ вблизи КС определило в свое время [6] появление согласованных по всем входам устройств с нечетным числом плеч, что с точки зрения классических СВЧ систем невозможно.

А применение обнаруженного в [2] «Явления нулевого и полного отражения от торцов ПлДВ специальной формы» может позволить существенно повысить качество таких уникальных устройств.

Литература

1. Подковырин С.А. Исследование волновых явлений в диэлектрических планарных элементах и принципов построения функциональных устройств на их базе // Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1981.
2. Гурьянов А.Ю., Серов В.В. Дифракционные явления на границах одномодовых планарных диэлектрических структур. // «Известия ВУЗов, Физика», 2012, № 9/2., в печати.
3. Мирзоян А.Э. Дифракционные явления и формирование чистых типов волн с помощью планарной резонаторной диэлектрической структуры. // Там же.
4. Андреев А.С., Минкара М.С.М. Поведение высших типов волн в области критических сечений нерегулярных диэлектрических структур. // Там же.
5. Будагян И.Ф., Взятых В.Ф., Дубровин В.Ф., Минкара М.С.М. Многоплечие диэлектрические соединения: принципы действия и закономерности дифракции высших типов волн. Доклад в этом сборнике.
6. Взятых В.Ф., Мировицкий Д.И., Шевченко В.В. и др. Синфазное направленное ответвление электромагнитной энергии в линиях с замедленными волнами. // Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, №1, с.37-41.